

Gli esperimenti di Fisica delle Particelle

Masterclass 2022 in Fisica
delle Particelle Elementari

9 Marzo 2022

Dualismo onda-particella

Per le leggi della meccanica quantistica, ogni particella può essere vista come un'onda con lunghezza d'onda λ inversamente proporzionale alla sua quantità di moto



La lunghezza d'onda associata prende il nome di la lunghezza d'onda di De Broglie

Per studiare la natura di un qualunque oggetto, dobbiamo usare delle sonde (radiazione elettromagnetica o particelle) la cui lunghezza d'onda sia dello stesso ordine di grandezza della dimensione dell'oggetto che vogliamo analizzare

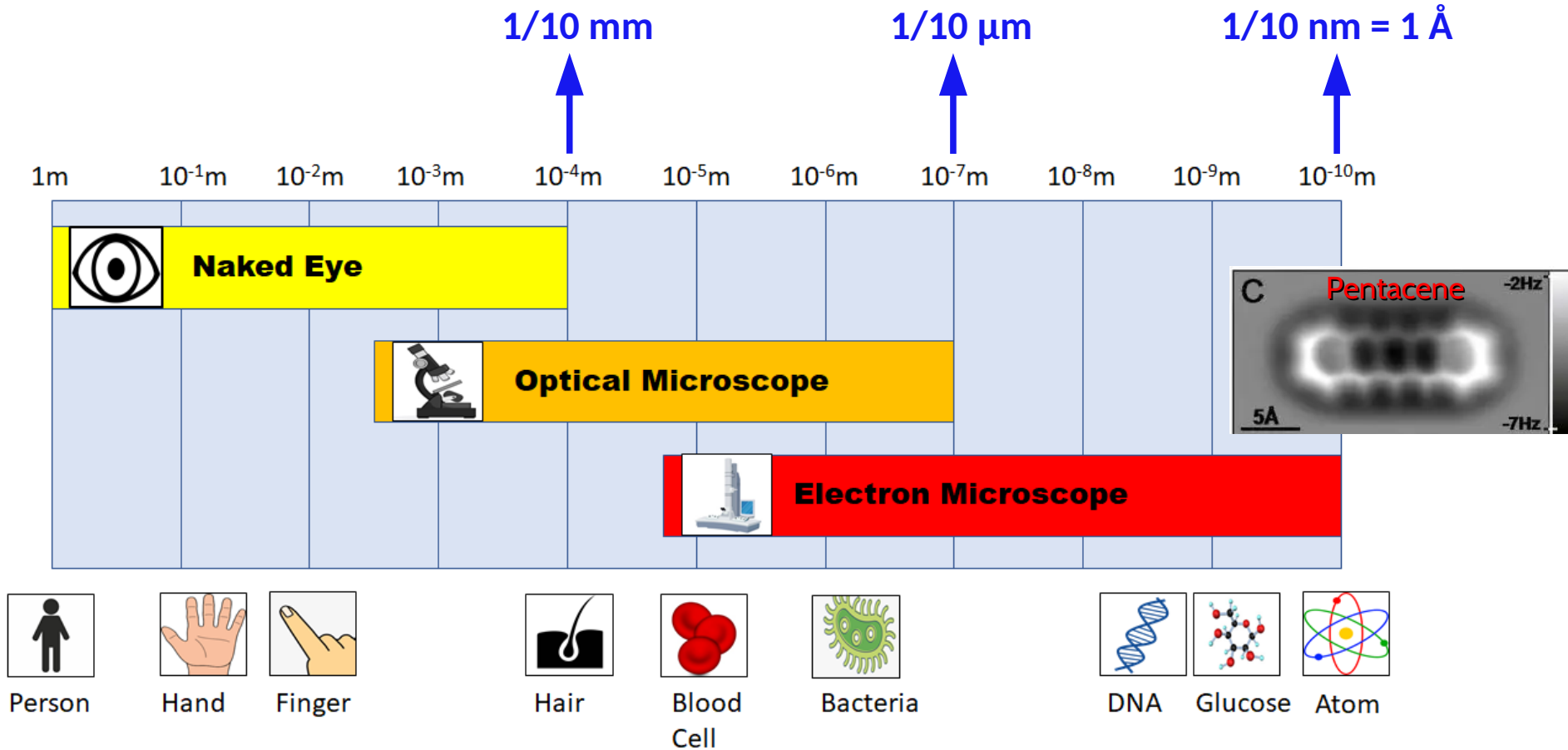
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

PICCOLE DIMENSIONI \leftrightarrow GRANDI ENERGIE

$$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Vediamo qualche esempio...

Osservazione su diverse scale



Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare

Gli acceleratori di particelle

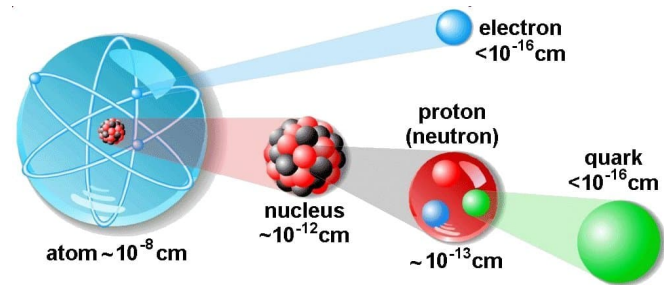
Abbiamo quindi bisogno di “microscopi” molto potenti per poter indagare sulla struttura della materia nucleare → **gli acceleratori di particelle**

Perchè gli acceleratori di particelle?

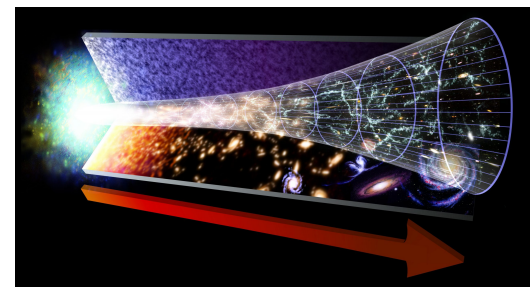
1) Per disporre di una radiazione di lunghezza d'onda sufficiente piccola e adatta all'esplorazione della materia nucleare e subnucleare
 $E \sim 10 \text{ TeV} \rightarrow \lambda \sim 10^{-19} \text{ m}$ (10'000 inferiore al raggio del protone)

2) Per disporre dell'energia necessaria a **produrre** particelle pesanti instabili, non presenti nella materia ordinaria. La famosa equazione di Einstein stabilisce la relazione fra la massa e l'energia

3) Per studiare la materia nucleare in condizioni estreme, simili a quelle esistente pochi istanti dopo il Big Bang

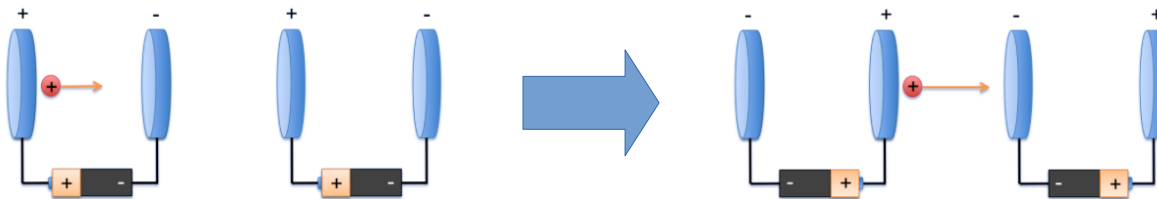
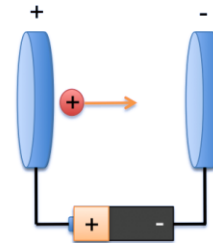


$$E = mc^2$$



Come vengono accelerate le particelle?

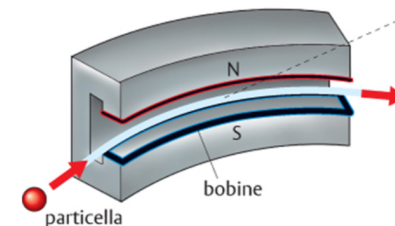
- Le particelle cariche vengono accelerate da un **campo elettrico**
 - un solo elettrodo necessiterebbe di una **differenza di potenziale** elevatissima
- Serie di elettrodi cilindrici bucati (all'interno dei quali c'è il vuoto e che i protoni possono attraversare) tra i quali viene alternata la direzione del campo elettrico



- Nella realtà, l'inversione della polarità del campo elettrico viene svolta da un **generatore di radiofrequenza** e la successione di elettrodi è rimpiazzata da **cavità risonanti**



- Potenti **campi magnetici** sono applicati per mantenere le particelle lungo una traiettoria curvilinea (**forza di Lorentz**)



Unità di misura

In fisica delle particelle, l'energia si misura in **elettronvolt (eV)** e non in Joule (J)

1 eV è l'aumento di energia di un elettrone quando è accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Sono molto utilizzati i multipli dell'elettronvolt

- **1 keV** → mille elettronvolt (10^3 eV) !
- **1 MeV** → un milione di elettronvolt (10^6 eV) !
- **1 GeV** → un miliardo di elettronvolt (10^9 eV) !
- **1 TeV** → mille miliardi di elettronvolt (10^{12} eV) !

Vedremo che gli acceleratori nel corso della loro storia hanno fornito alle particelle energie sempre più alte (MeV → TeV)

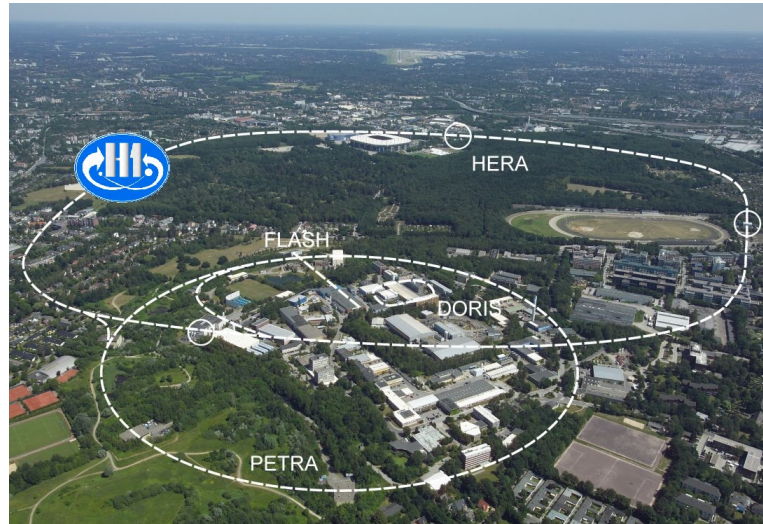
Diversi tipi di acceleratori

- La dimensione dell'acceleratore determina la massima energia raggiungibile
 - Ma non solo...anche i campi magnetici applicati giocano un ruolo importante → servono per far seguire alle particelle traiettorie circolari

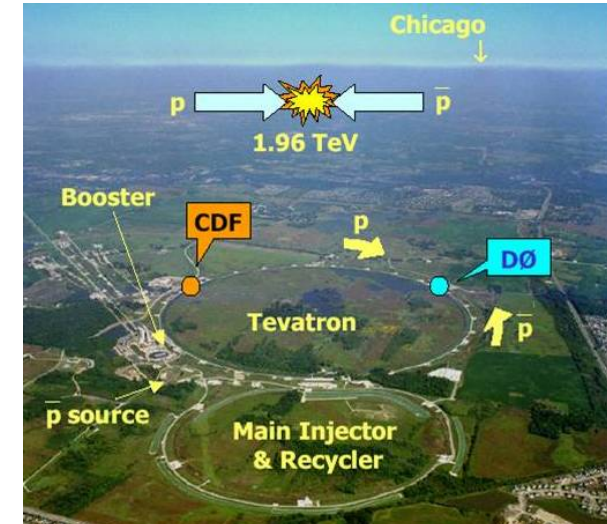
SLAC (California, USA)
Collider elettrone positrone
3 km, E~100 GeV



Hera (Amburgo, Germania)
Collider elettrone protone
6.3 km, E~300 GeV

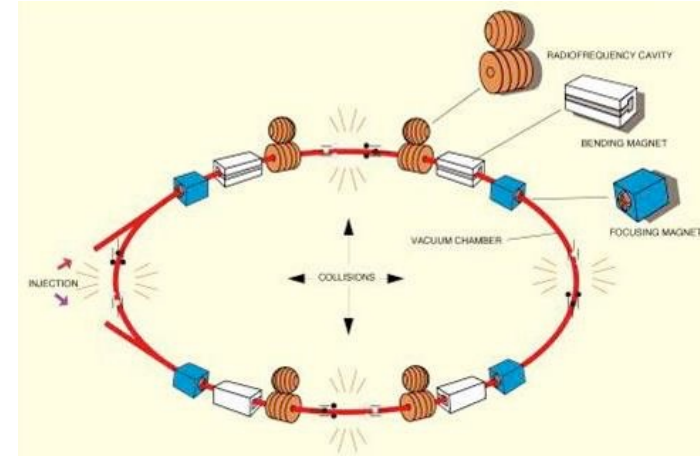


Tevatron (Illinois, USA)
Collider protone anti-protone
6.3 km, E~2 TeV



I collider

- Due fasci di particelle viaggiano in direzioni opposte (in tubi a vuoto)
- Le particelle viaggiano raggruppate in pacchetti (bunches)
 - In LHC ogni bunch contiene $\sim 10^{11}$ (100 miliardi!!!!) di protoni
- Accelerazione, curvatura e foccheggiamento sono effettuati per mezzo di elementi magnetici diversi lungo l'anello
- I pacchetti vengono fatti incrociare tra di loro in uno a più punti dove le particelle collidono. Nei punti di interazione sono collocati dei grandi rivelatori di particelle per osservare da vicino cosa è successo nella collisione

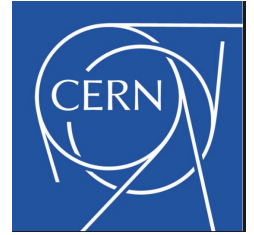


A Frascati è stato progettato e costruito il primo collisore (elettrone - positrone) della storia, grazie a Bruno Touschek negli anni 60



European Organization for Nuclear Research (CERN)

- Il CERN è il più grande laboratorio al mondo per la fisica delle particelle
- Fondato nel 1954, si trova nei pressi di Ginevra, al confine franco-svizzero
- 23 stati membri → L'Italia è tra i paesi fondatori
- L'italiana, Fabiola Gianotti, è direttrice del CERN da 2016



European Organization for Nuclear Research (CERN)



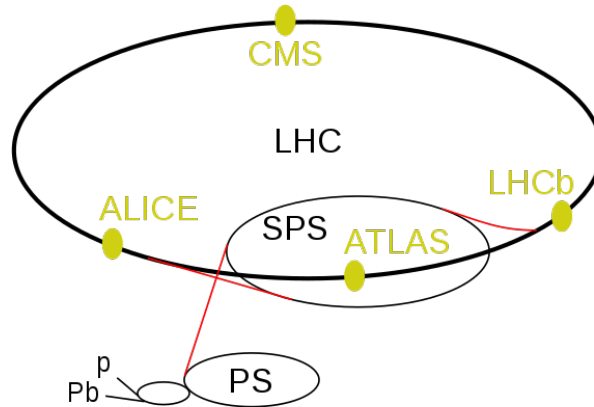
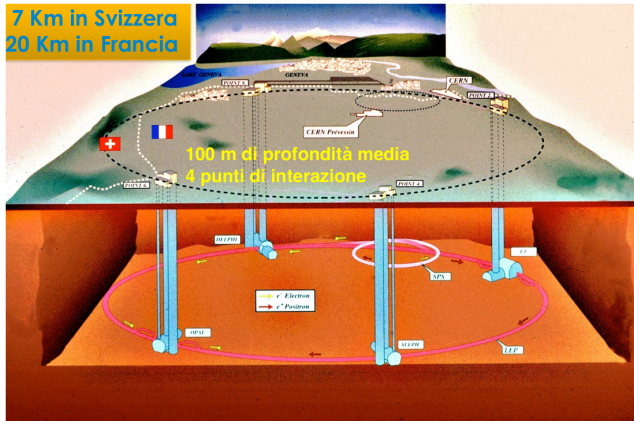
The Globe of Science and Innovation
(spazio espositivo)



Il "main auditorium"

Il Large Hadron Collider (LHC)

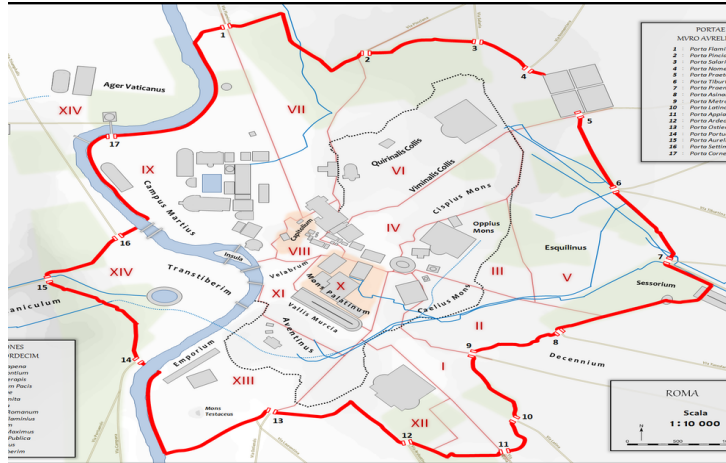
- Il CERN dispone di un eccezionale complesso di macchine acceleratrice che ha il suo culmine nel Large Hadron Collider



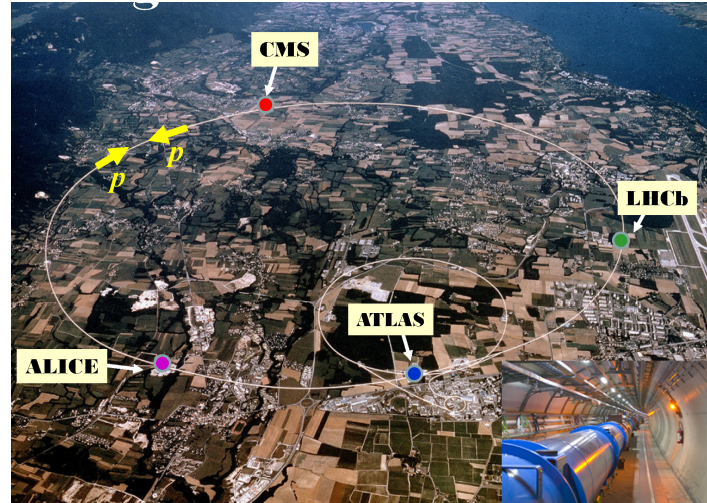
- Energia di collisione dei fasci di protoni 13 TeV
- ~ 3000 pacchetti per ognuno dei fascio, con 100 miliardi di protoni in ogni pacchetto
- I protoni viaggiano quasi alla velocità della luce ($v=0.999999991 c$) → fanno 10'000 giri al secondo! In 10 ore percorrono 10 miliardi di km (Terra-Nettuno-Terra)
- Collidono ogni 25 ns → 40 MHz

LHC: un collider da 27 km

Mura Aureliane
~19 km



Large Hadron Collider
~27 km



Grande Raccordo Anulare
~68 km



- 27 km di circonferenza a 100 m di profondità
- ~1200 magneti superconduttori da ~8 T

Lo strumento scientifico
più grande del mondo!

LHC: un collider da 27 km



...ci si sposta in treno o in moto!



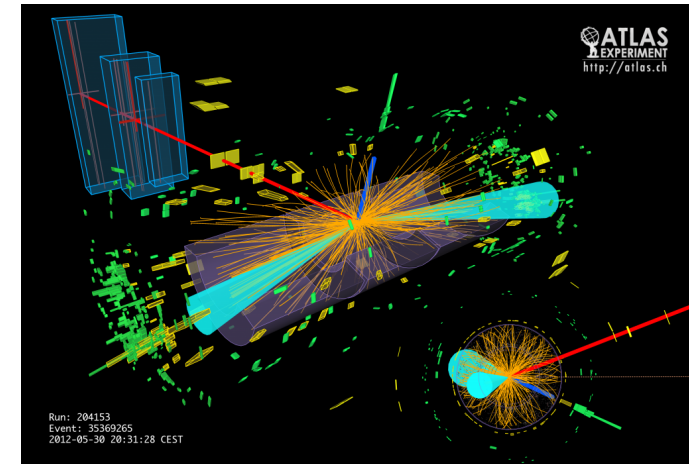
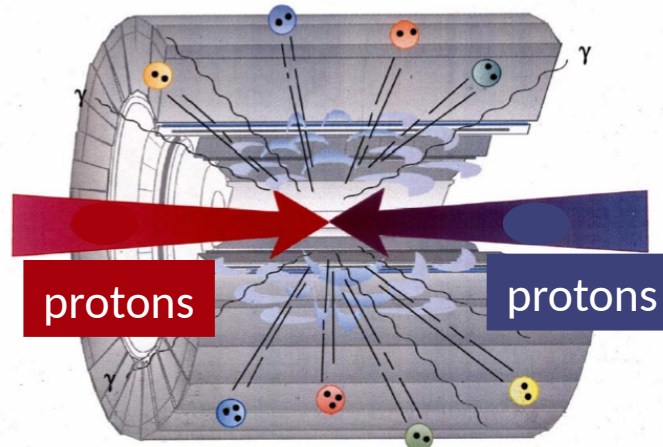
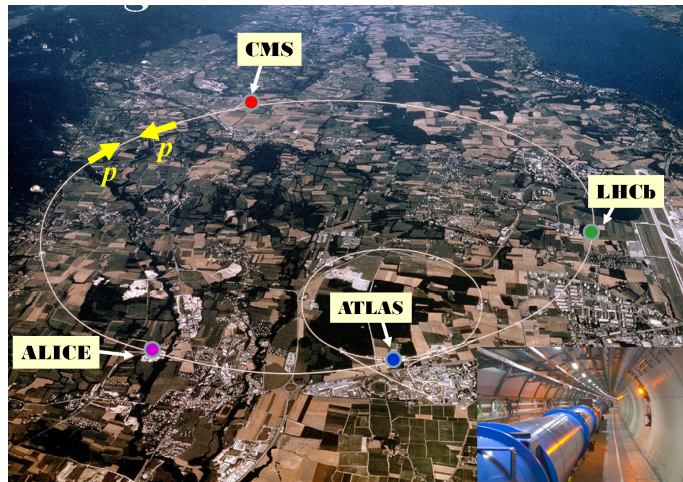
LHC: una macchina da record

- LHC è il più potente strumento mai costruito per studiare l'infinitamente piccolo
- 1232 dipoli magnetici superconduttori che producono un campo da 8.36 Tesla (campo magnetico terrestre ~ 0.00000040 Tesla)
- 700.000 litri di Elio liquido alla temperatura di 1.9K (-271°C)
- 30.000 tonnellate di materiale a 1.9K (-271°C)
 - è più freddo dello spazio profondo!
- 27 km di vuoto spinto (10^{-10} torr, confrontabile con il vuoto cosmico)
- E' necessaria una potenza di 120 MW per il funzionamento di LHC (230 MW per l'interno CERN) → più o meno la potenza elettrica richiesta da tutto il Cantone di Ginevra !

Le collisioni tra protoni

- I fasci di protoni collidono in 4 punti di LHC, producendo nuove particelle nello stato finale
- I 4 punti di interazione sono racchiusi da vari rivelatori di particelle che permettono di
 - misurare le caratteristiche (energia, carica..) delle particelle dello stato finale
 - ricostruire a ritroso l'evento ed identificare le particelle prodotte nell'interazione

Cosa è stato prodotto?
E come? → chi ha interagito?





Acceleratori “made in Italy”

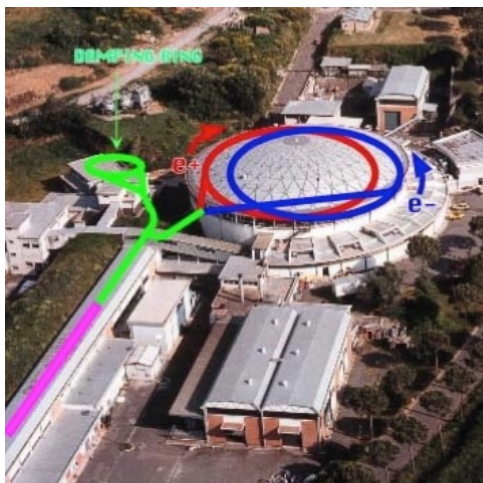
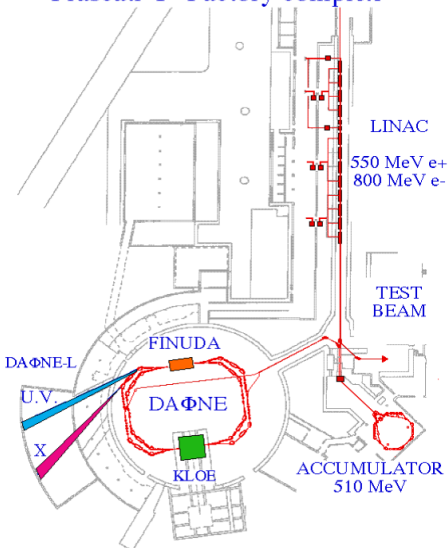


Acceleratore DAFNE

Laboratori Nazionali di Frascati, INFN



Frascati Φ -Factory complex



Elettra → acceleratore per luce di sincrotrone, Trieste



Centro Nazionale Adroterapia Oncologica, Pavia



Vediamo ora come funzionano
i rivelatori di particelle

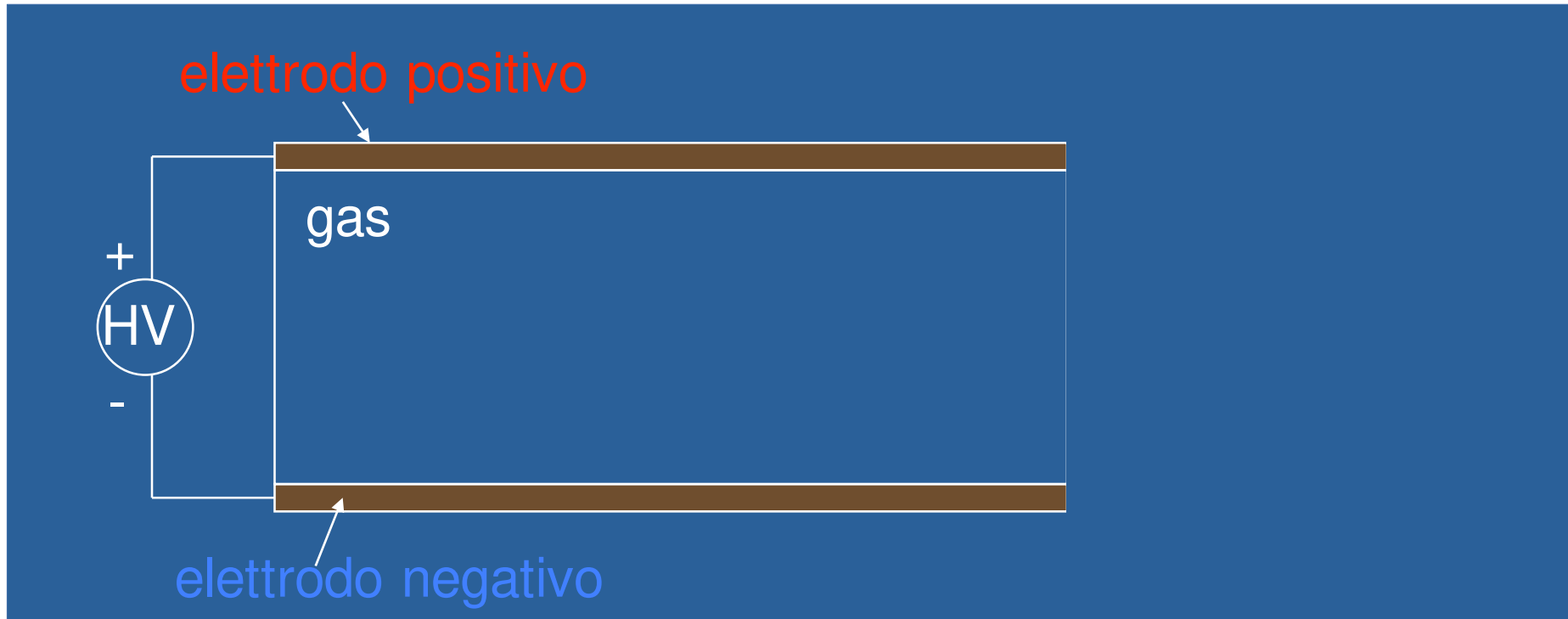
Come e perchè riveliamo le particelle?

- Le particelle si studiano con i rivelatori, i quali servono a
 - **Identificare il tipo di particelle prodotte**
 - **Misurarne traiettoria, carica, energia e quantità di moto**
 - **A stabilire che cosa è accaduto nella collisione**
 - Sono state prodotte delle particelle già note? È stata prodotta una nuova particella mai osservata prima?
- Molte particelle hanno vita breve e decadono in particelle più leggere
 - Vengono rivelate solo queste ultime
 - Dalle loro caratteristiche si risale alle proprietà delle particelle che le hanno generate

Alla ricerca di tracce



Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



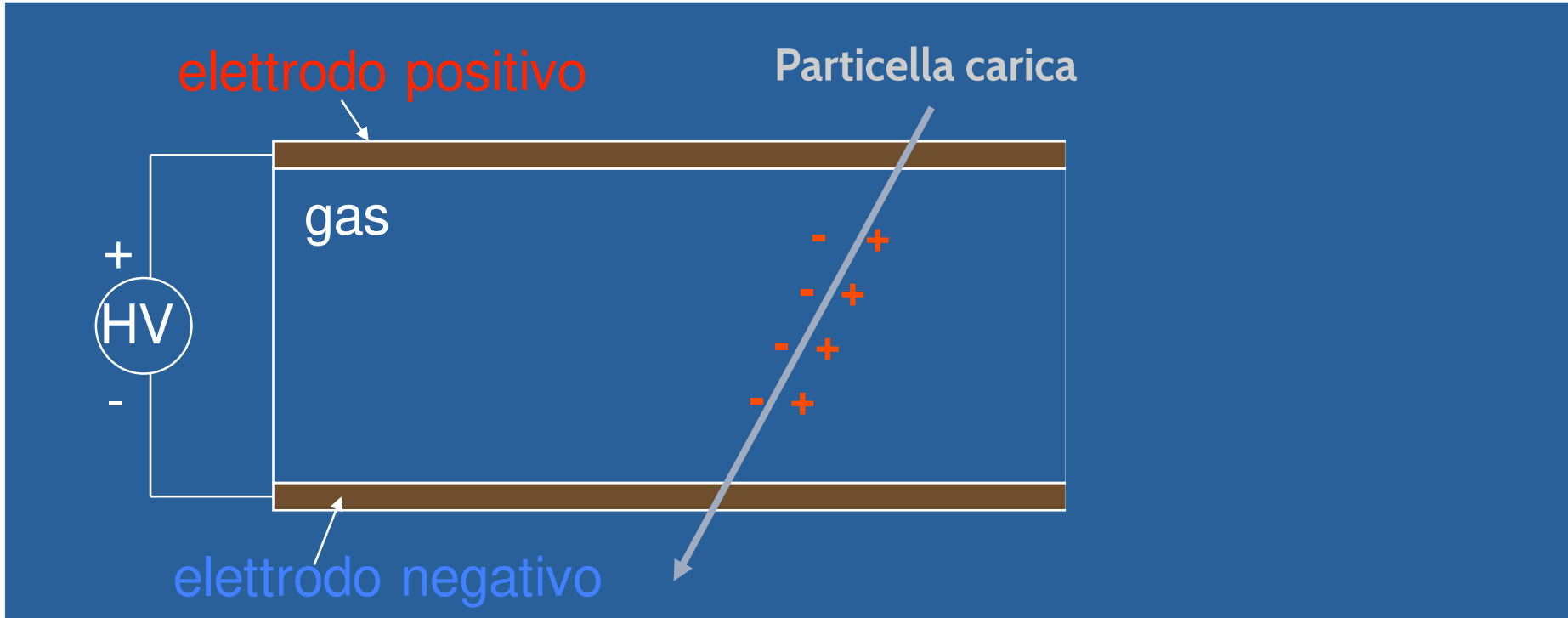
La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia

In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è la **ionizzazione**

Alla ricerca di tracce



Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



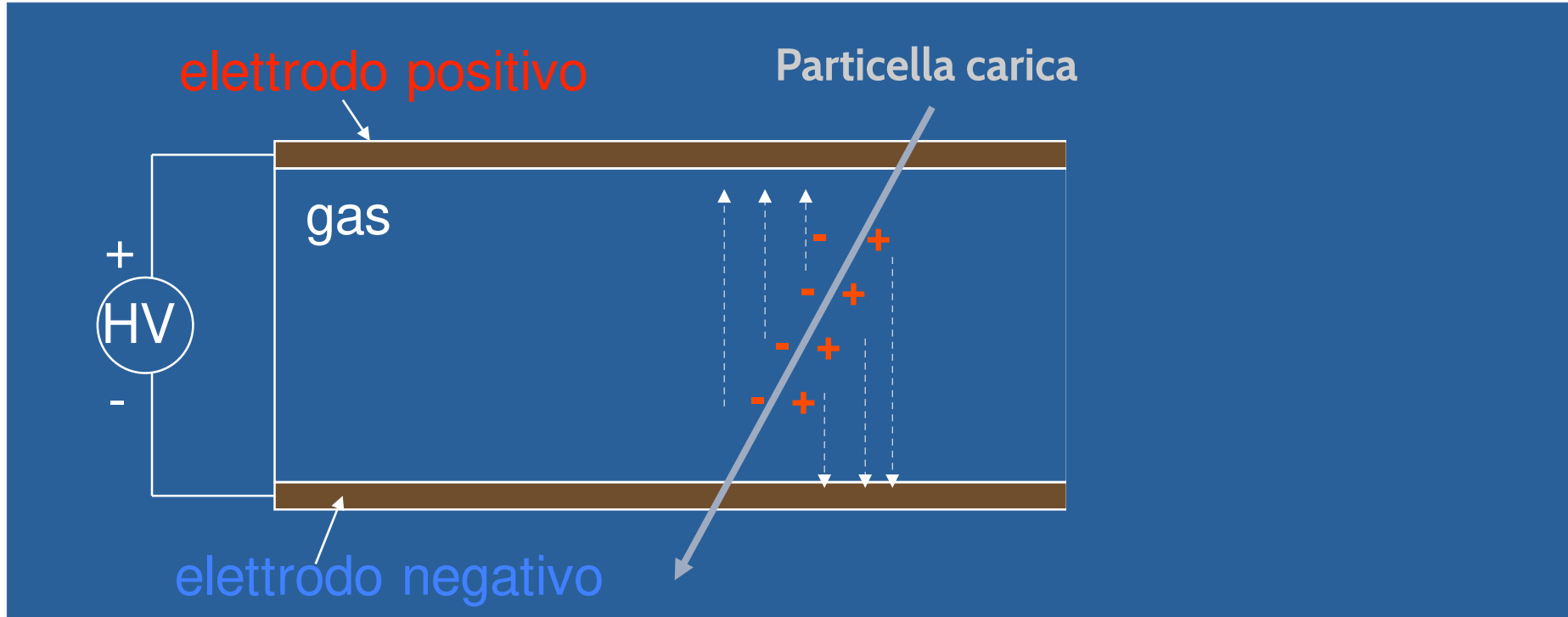
La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia

In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è la **ionizzazione**

Alla ricerca di tracce



Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



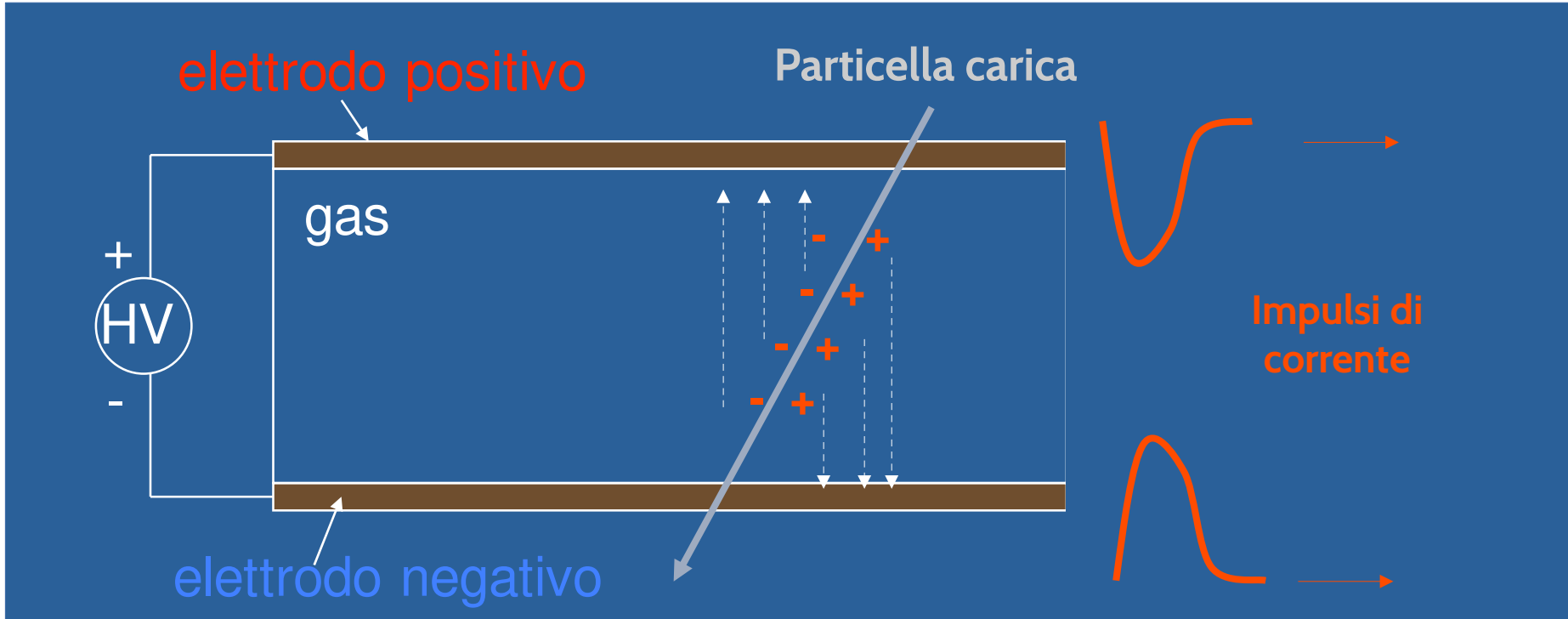
La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia

In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è la **ionizzazione**

Alla ricerca di tracce



Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia

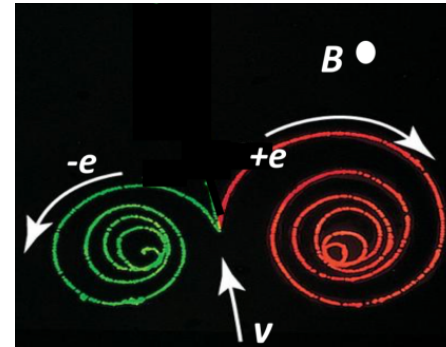
In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è la **ionizzazione**

Misura della carica e dalla quantità di moto

- Una particella carica in moto in un campo magnetico segue una traiettoria curvilinea a causa della forza di Lorentz
- la traiettoria segue un arco di circonferenza dal raggio di curvatura posso ricavare:
$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = q\mathbf{B}R$$

- dal tipo di curvatura è anche possibile capire la carica

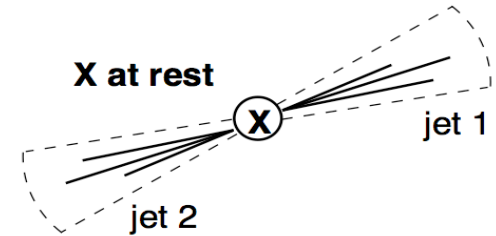
Evento in una camera a bolle



le tracce di un elettrone (e^-) ed un positrone (e^+) generate dalla collisione di un fotone con gli atomi di idrogeno

Come appaiono i quark?

- I quark non esistono allo stato libero, a causa dell'interazione forte (**confinamento adronico**)
- Convertono subito la loro energia in fiotti di particelle detti jet

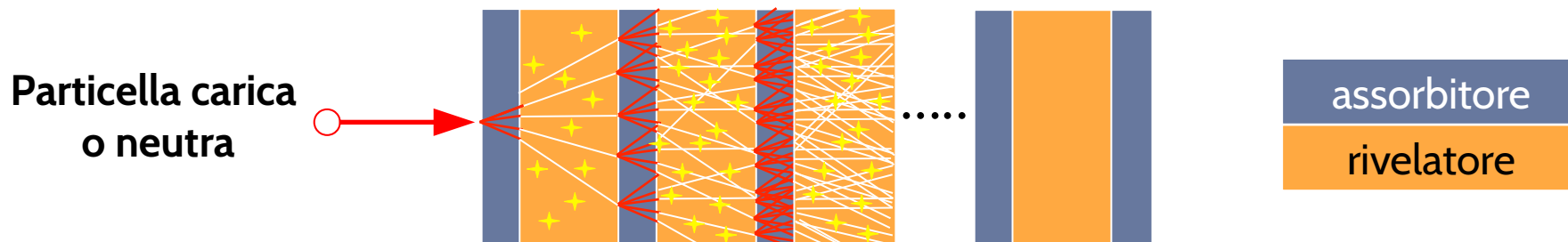


E i neutrini?

- I neutrini, così come i muoni, sono le uniche particelle che emergono dal sistema dei rivelatori. Al contrario dei muoni, i neutrini non interagiscono per niente con i materiali dei rivelatori e non sono direttamente rivelabili
- Il principio di conservazione dell'energia ci viene in aiuto. Se nello stato finale osserviamo uno “sbilanciamento” di energia rispetto allo stato iniziale, allora questa differenza di energia è attribuibile ai neutrini

Misura dell'energia

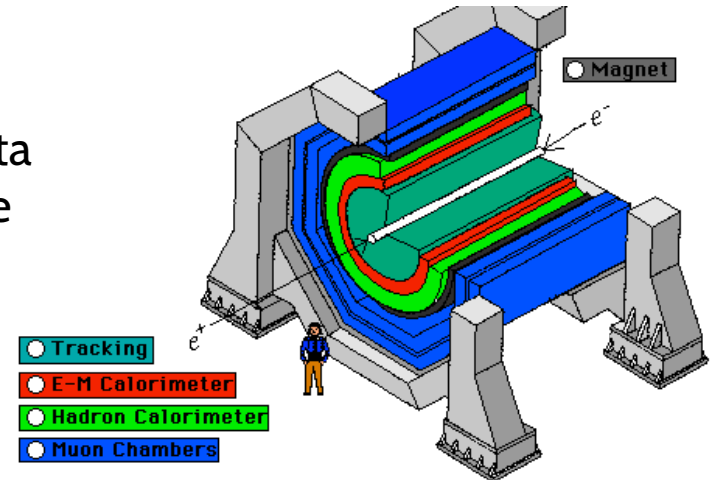
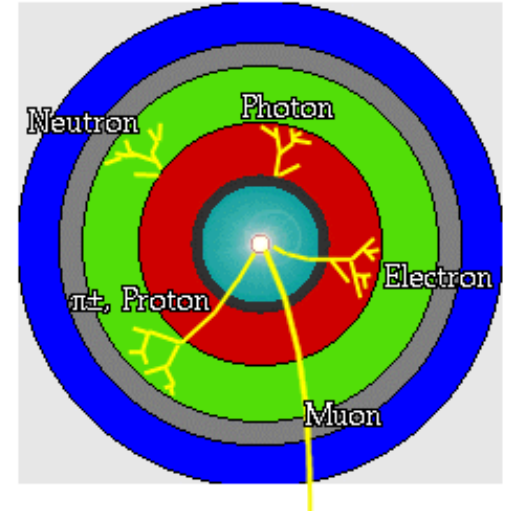
- I calorimetri hanno una struttura a strati alternati di assorbitori passivi e strati di rivelatore
- Le interazioni che avvengono a loro interno formano i fenomeni di **sciame elettromagnetico** (se la particella iniziale è un **elettrone, fotone o positrone**) o **sciame adronici** (se la particella iniziale è un **adrone**)
- I calorimetri sono rivelatori “distruttivi” → tutta l'energia viene rilasciata e nessuna particella riesce a oltrepassarlo...ma non i **muoni**!



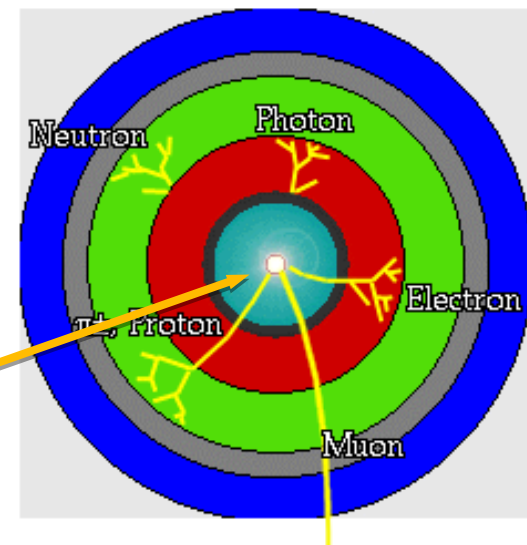
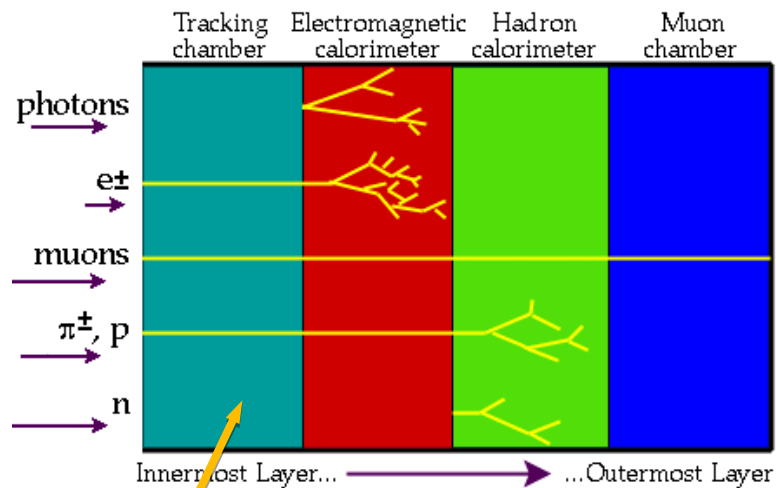
- L'assorbitore frena le particelle e consente di contenere lo sciame in dimensioni ridotte
- **L'energia depositata negli strati sensibili del rivelatore viene invece misurata (emissione di luce in materiali scintillanti)**

Apparati di rivelatori

- Gli apparati degli esperimenti al CERN sono costituiti da più rivelatori sensibili a diverse particelle
- La maggior parte hanno una simmetria cilindrica rispetto ai tubi dell'acceleratore/fascio → struttura a “cipolla”
- Questi rivelatori producono o segnali ottici od elettrici quando le particelle interagiscono con i mezzi attivi
- Combinando i vari segnali e le informazioni sull'energia ceduta e curvatura della traiettoria, si possono identificare le particelle

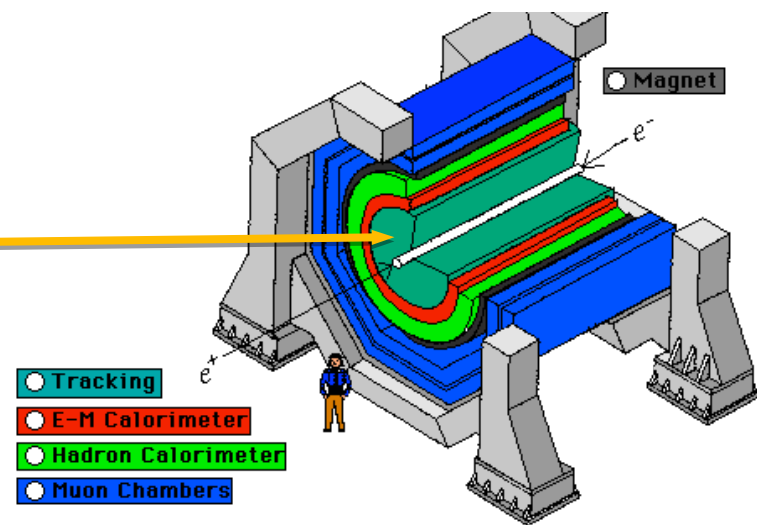


Tracciatori

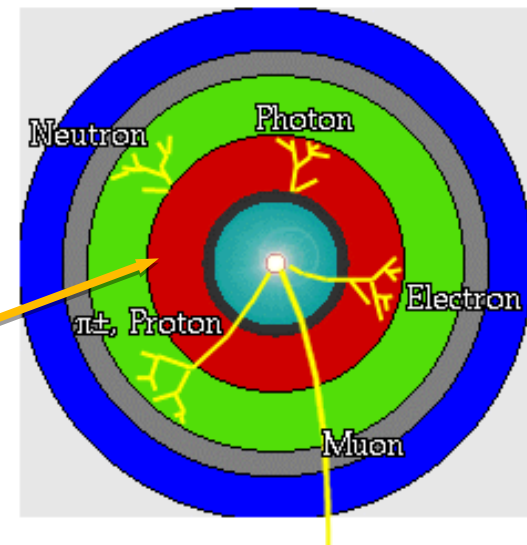
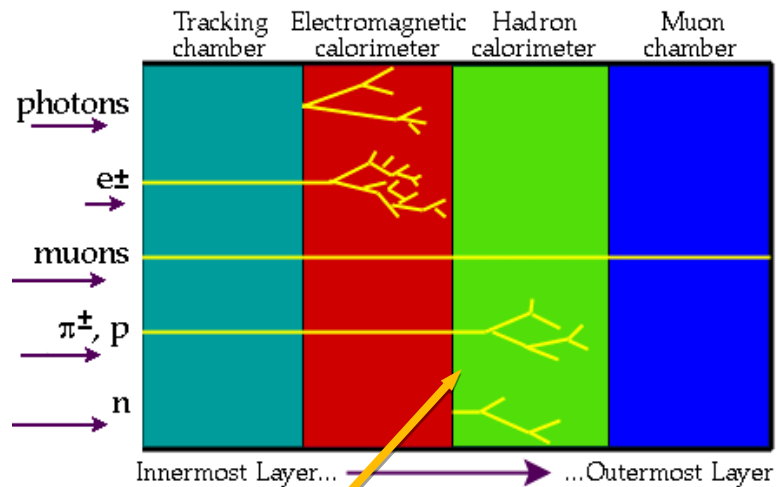


Tracciatore

Permettono di ricostruire le tracce lasciate dalle particelle cariche ed il vertice di interazione



Calorimetri



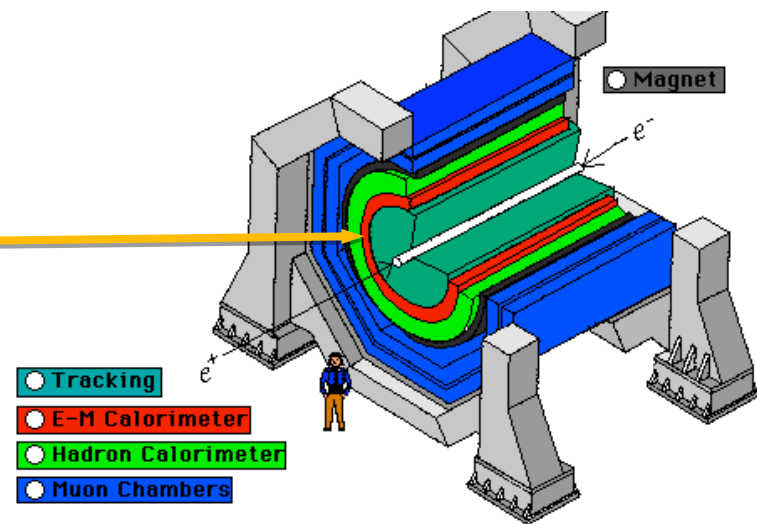
Calorimetri

Misurano l'energia rilasciata dalle particelle

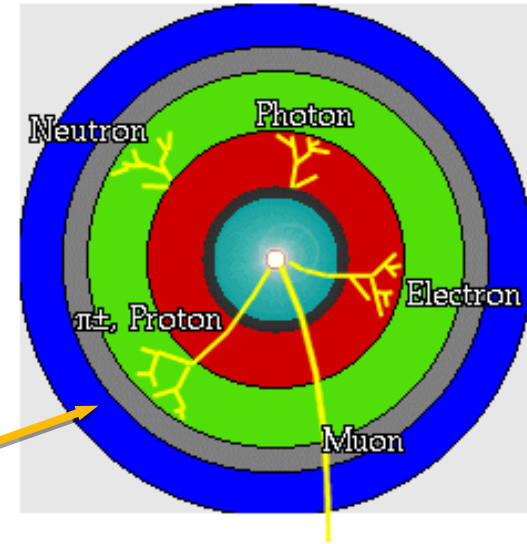
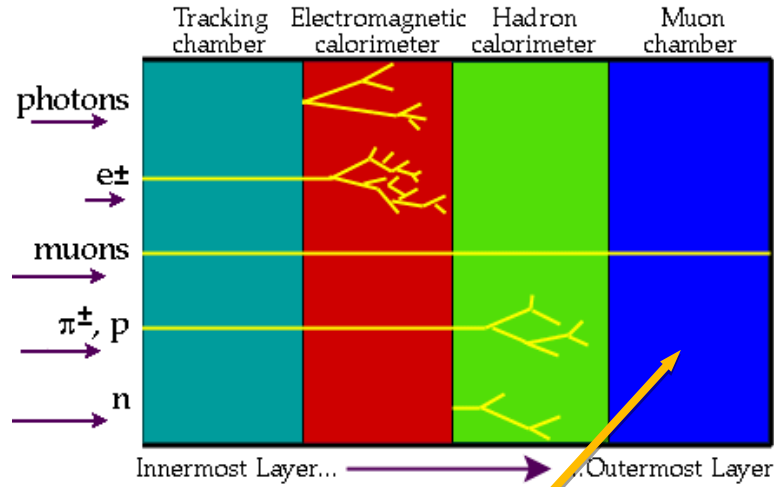
Le particelle diventano "sciame"

Calorimetri elettromagnetici → rivelano fotoni ed elettroni

Calorimetri adronici → rivelano gli adroni

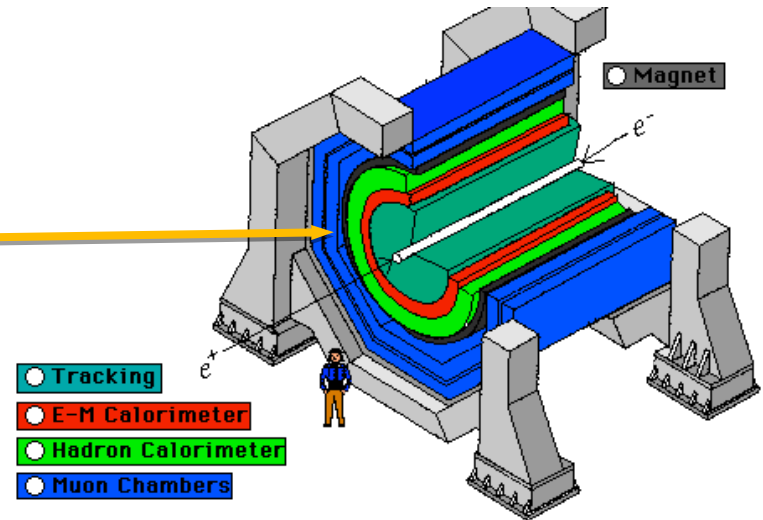


Rivelatori per muoni

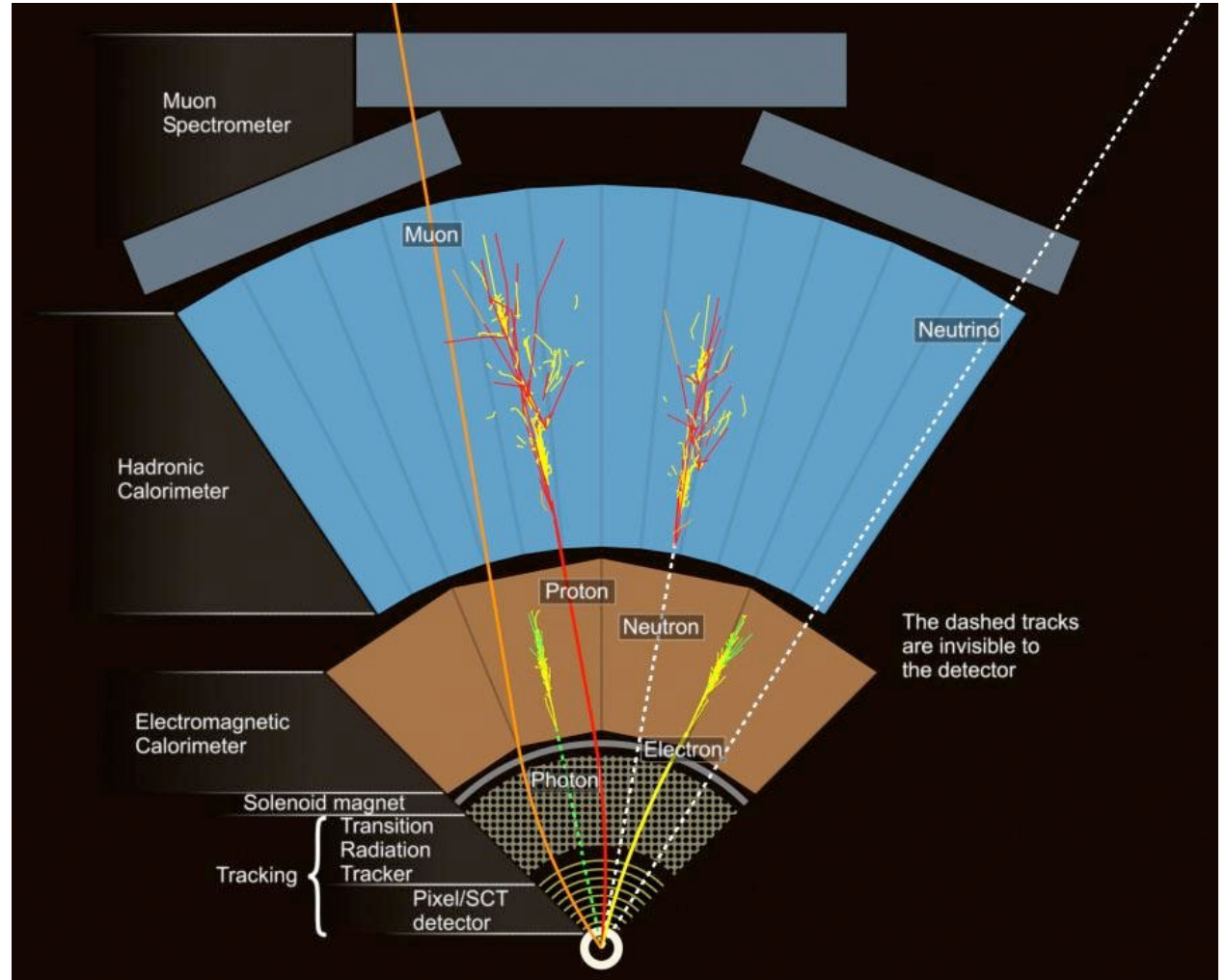
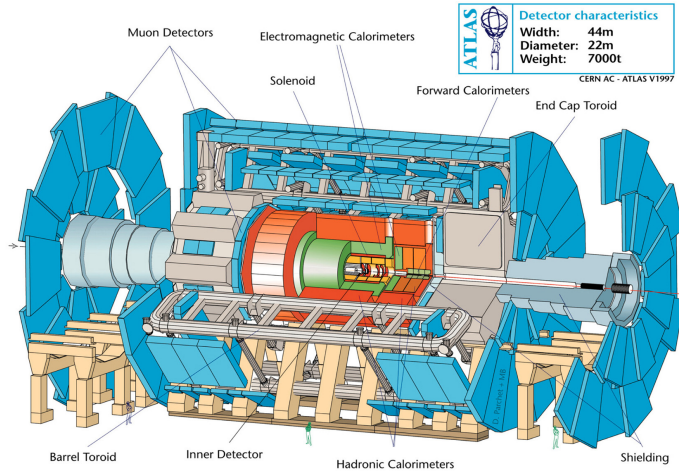


Rivelatori per muoni

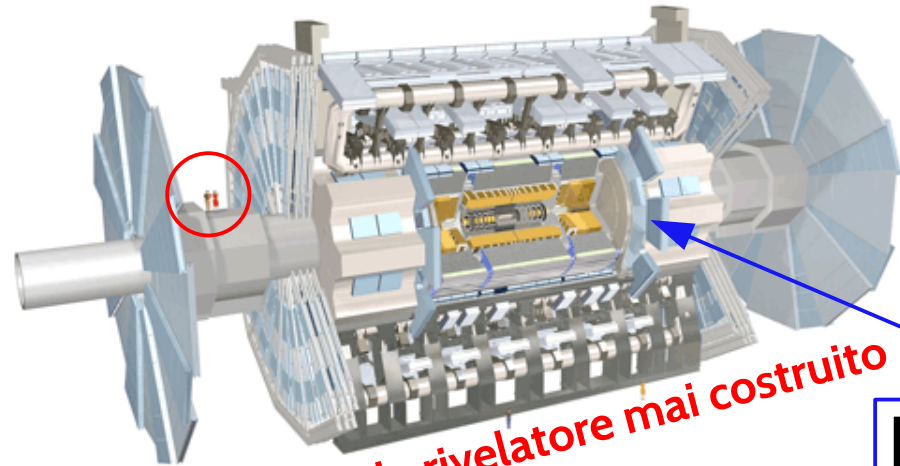
Rivelano i muoni, particelle molto penetranti



Uno "spicchio" di ATLAS



Il rivelatore ATLAS



Il più grande rivelatore mai costruito

The ATLAS Detector

- Diameter 25 m -- Length : 46 m
- Barrel toroid length 26 m
- Overall weight 7 000 tonnes
- ~ 100 million electronic channels
- ~ 3 000 km of cables

- La sezione INFN di Roma Tre collabora all'esperimento ATLAS fin dalla sua progettazione
- Alcuni dei rivelatori per muoni sono stati
- <http://www.roma3.infn.it/ricerca/atlas-2/>



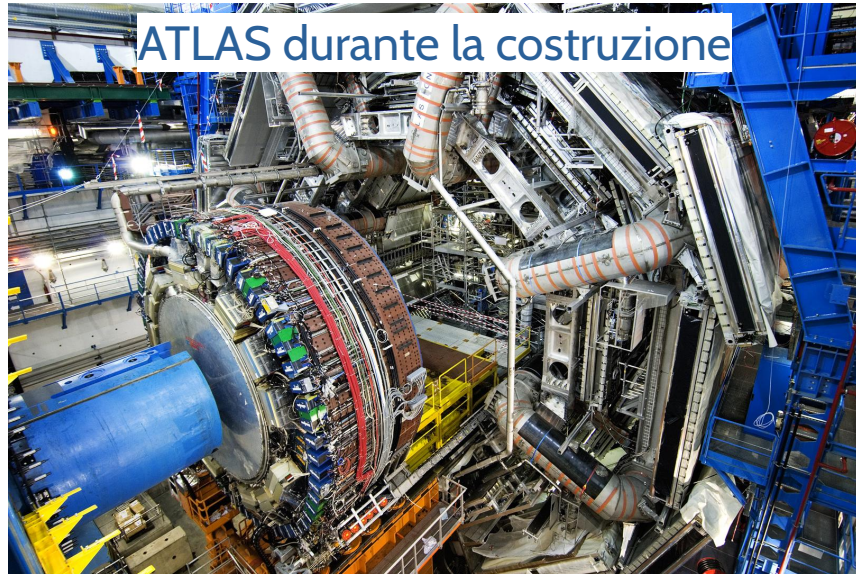
Il rivelatore ATLAS



La sala controllo



I rivelatori per muoni

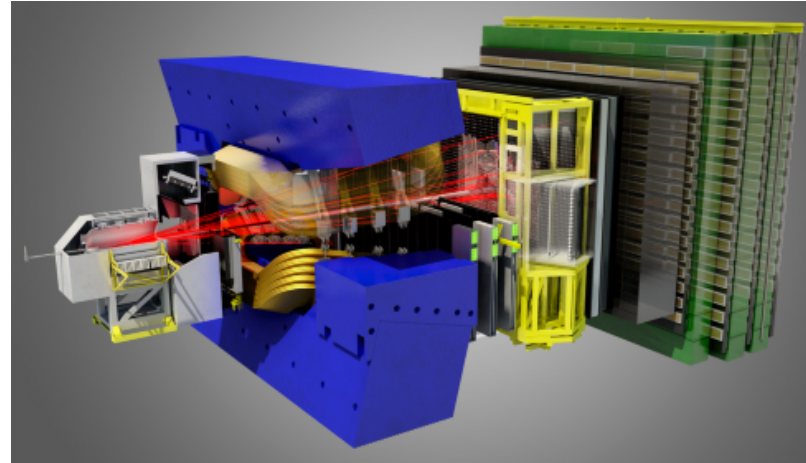
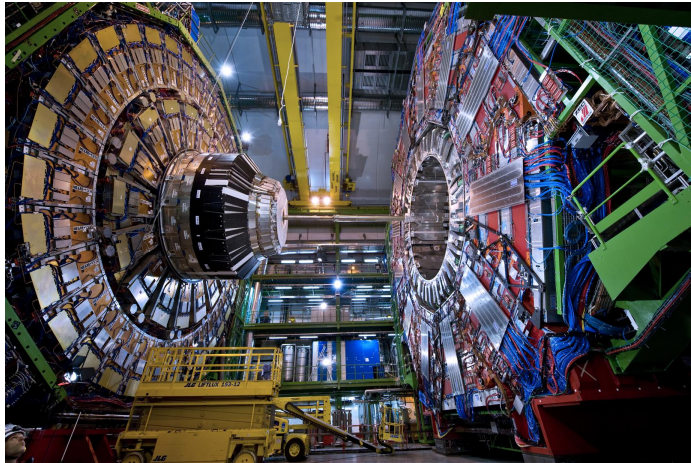
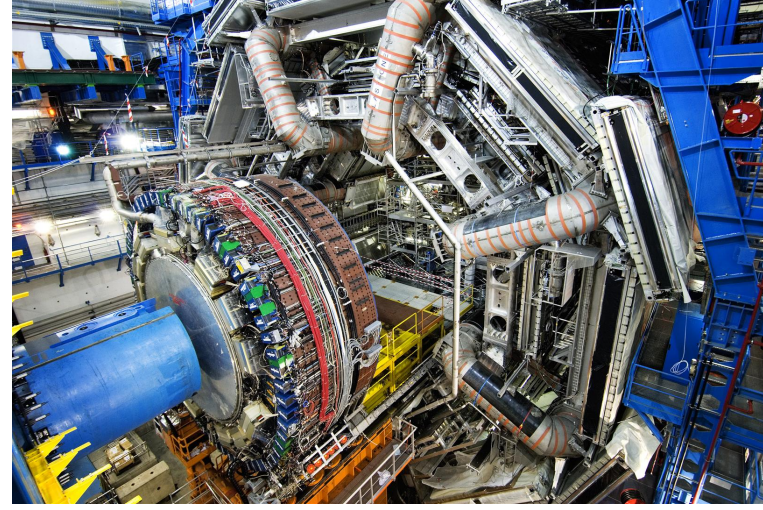
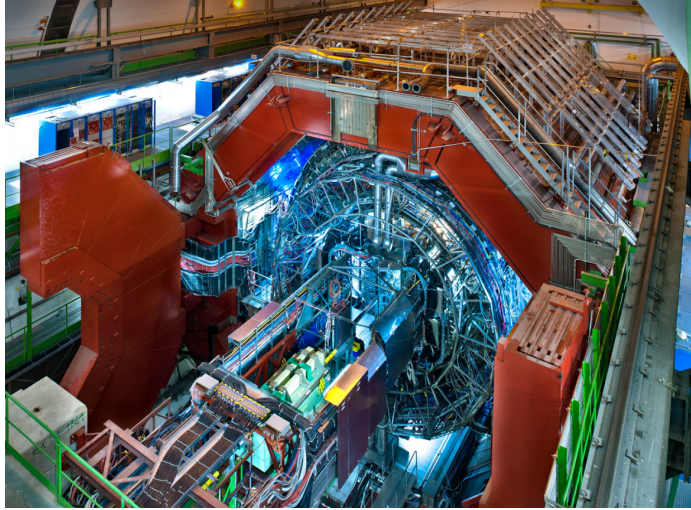


ATLAS durante la costruzione

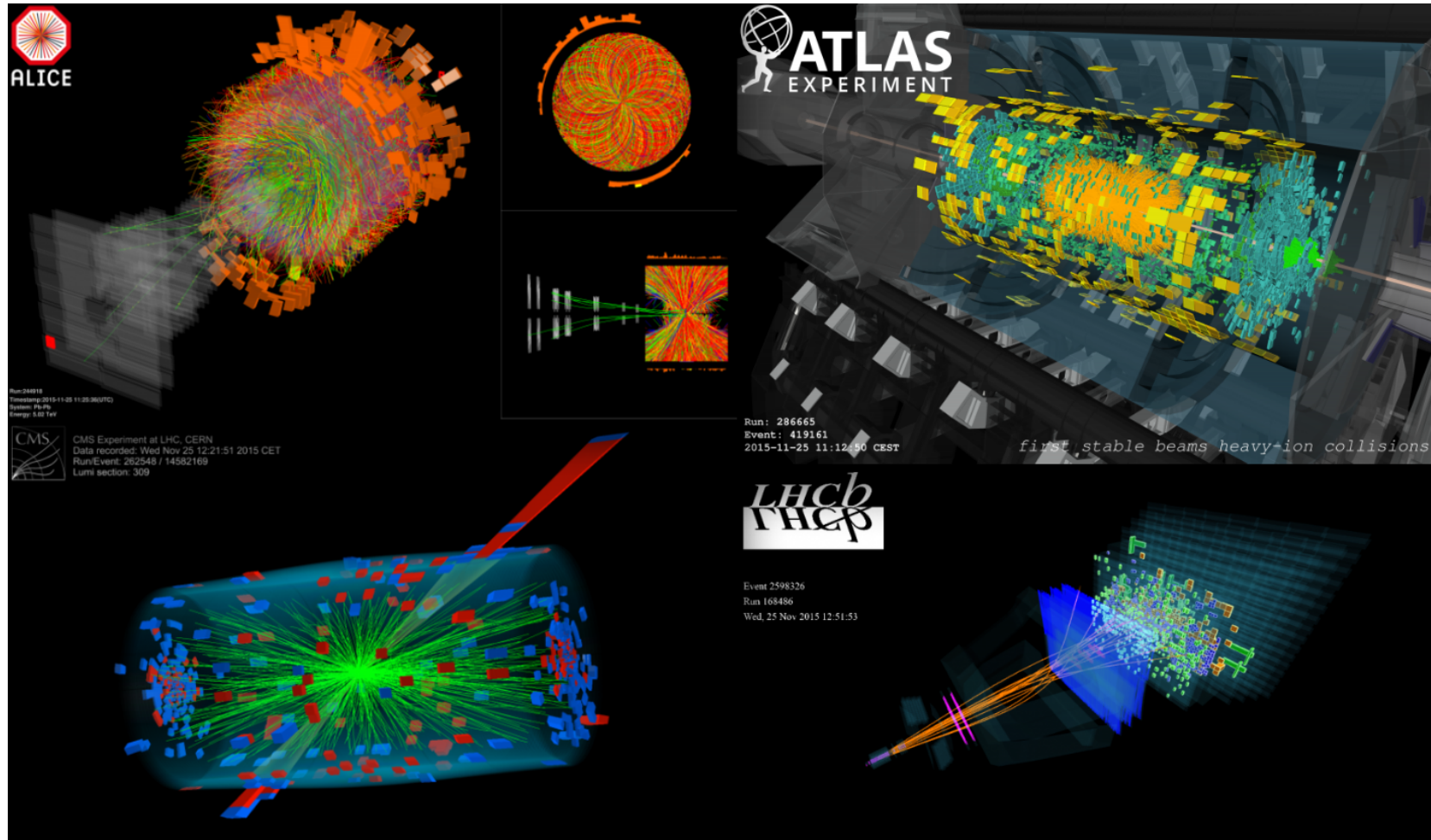


Il sistema magnetico toroidale

Gli apparati sperimentali lungo LHC

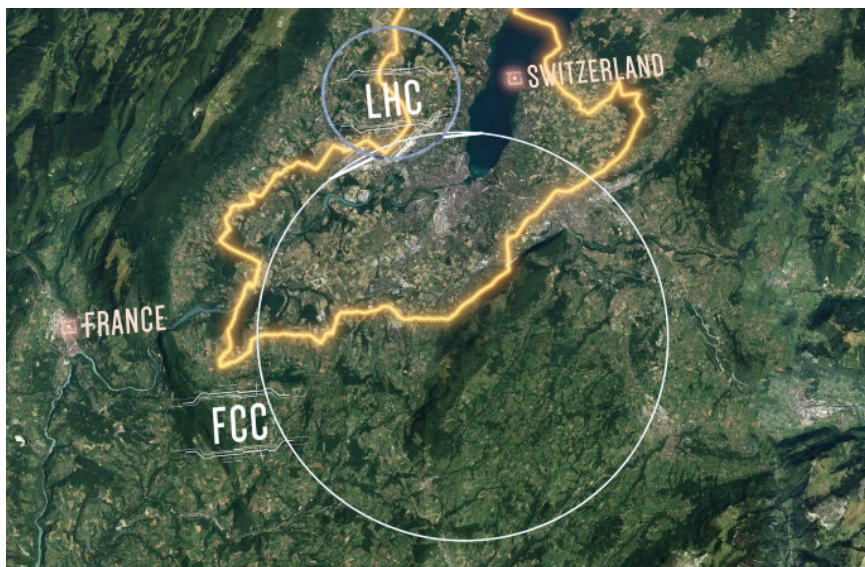


Gli apparati sperimentali lungo LHC



E dopo LHC?

- LHC permetterà agli esperimenti di raccogliere dati fino al ~2040
- Nel frattempo dobbiamo già pensare ai collider di domani, alle macchine del futuro...
- A cosa puntare? Acceleratori più grandi, per la cui progettazione e costruzione sono necessari alcuni decenni, e sviluppo di nuove tecniche di accelerazione



Future Circular Collider

Circumference: 80-100 km

Energy: 100 TeV (pp)
>350 GeV (e^+e^-)

Large Hadron Collider

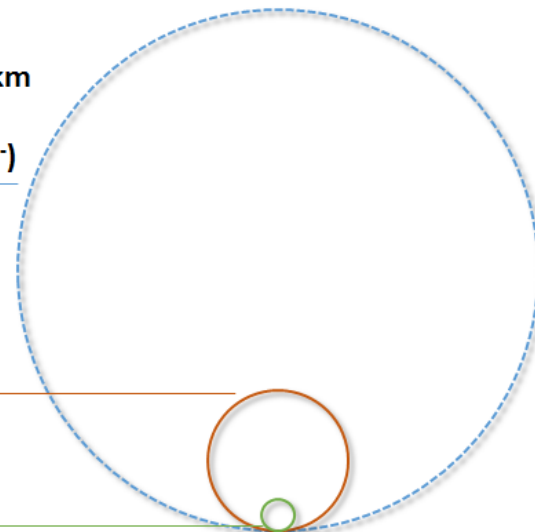
Circumference: 27 km

Energy: 14 TeV (pp)
209 GeV (e^+e^-)

Tevatron (closed)

Circumference: 6.2 km

Energy: 2 TeV



Le ricadute tecnologiche

- Oltre ad aver prodotto con continuità importanti risultati scientifici premiati più volte col Nobel, il CERN ha contribuito a importanti ricadute tecnologiche

il **World Wide Web (www)**



Tim Berners-Lee invented the World Web Web in 1989

Also called The Web or WWW

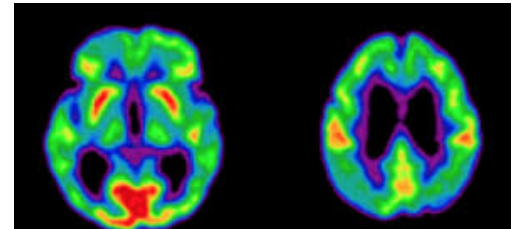
il **Touch Screen**



The Touch Terminal as developed for the Antiproton Accumulator (AA).

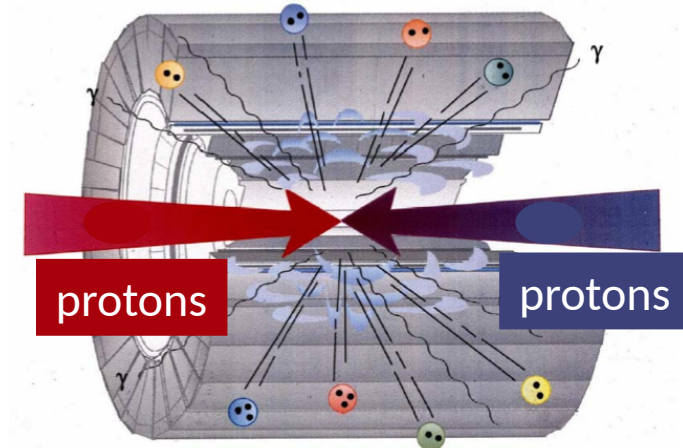
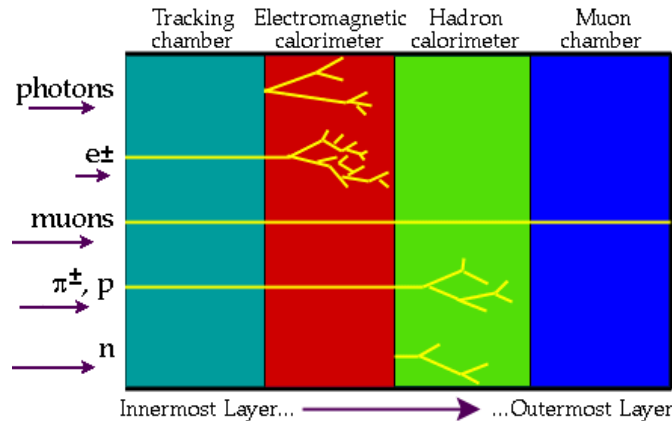
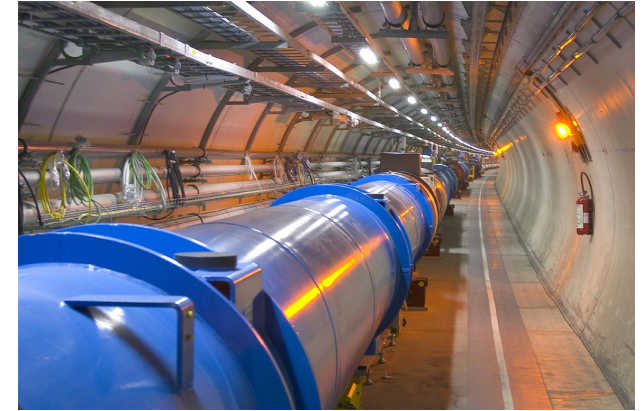


e la **PET**



Riepilogando...

- Gli acceleratori sono lo strumento per studiare la fisica delle particelle elementari
- I rivelatori sfruttano gli effetti del passaggio delle particelle attraverso la materia per:
 - misurare l'energia
 - identificare le particelle



Back-up

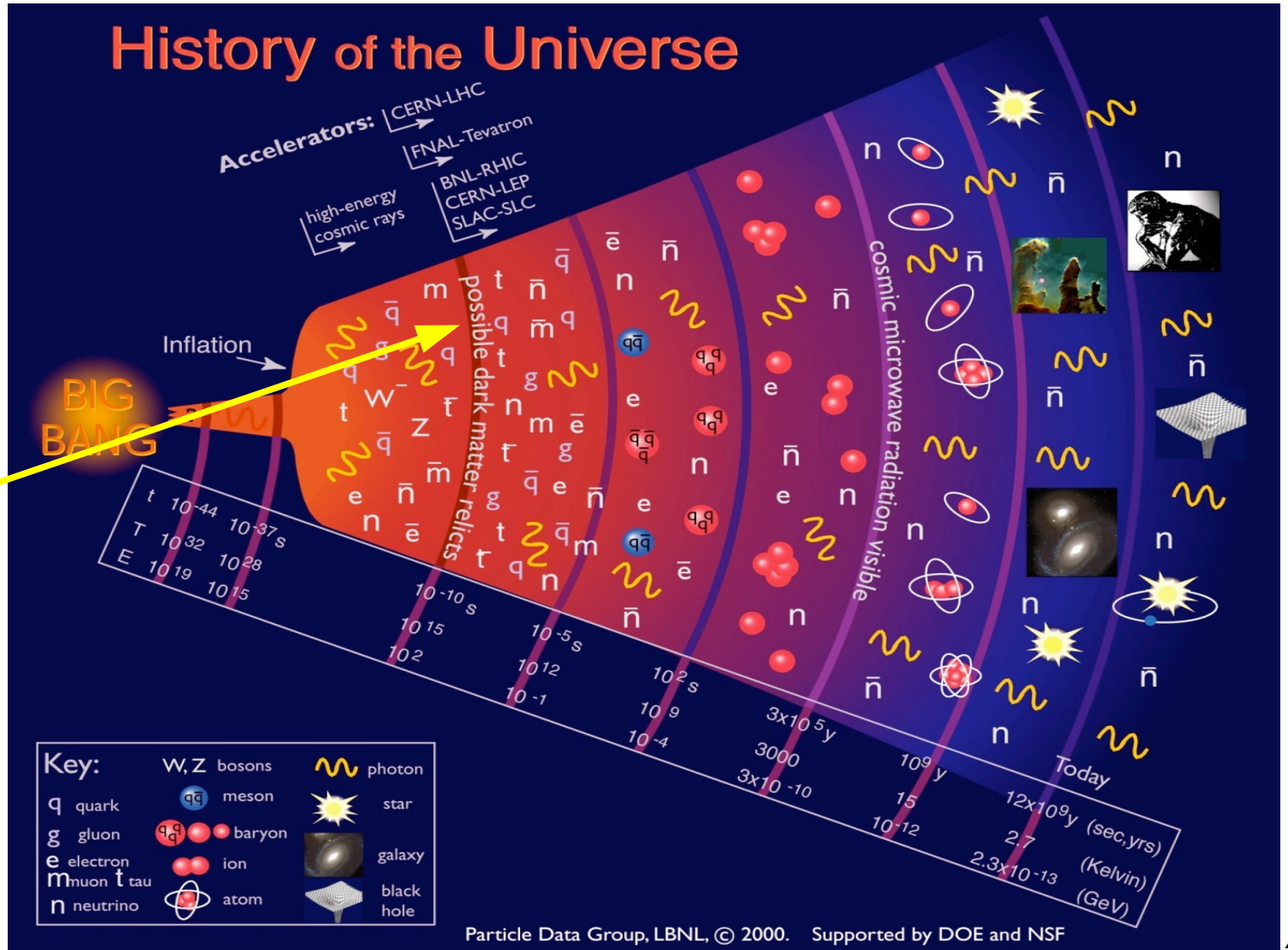
Il metodo scientifico



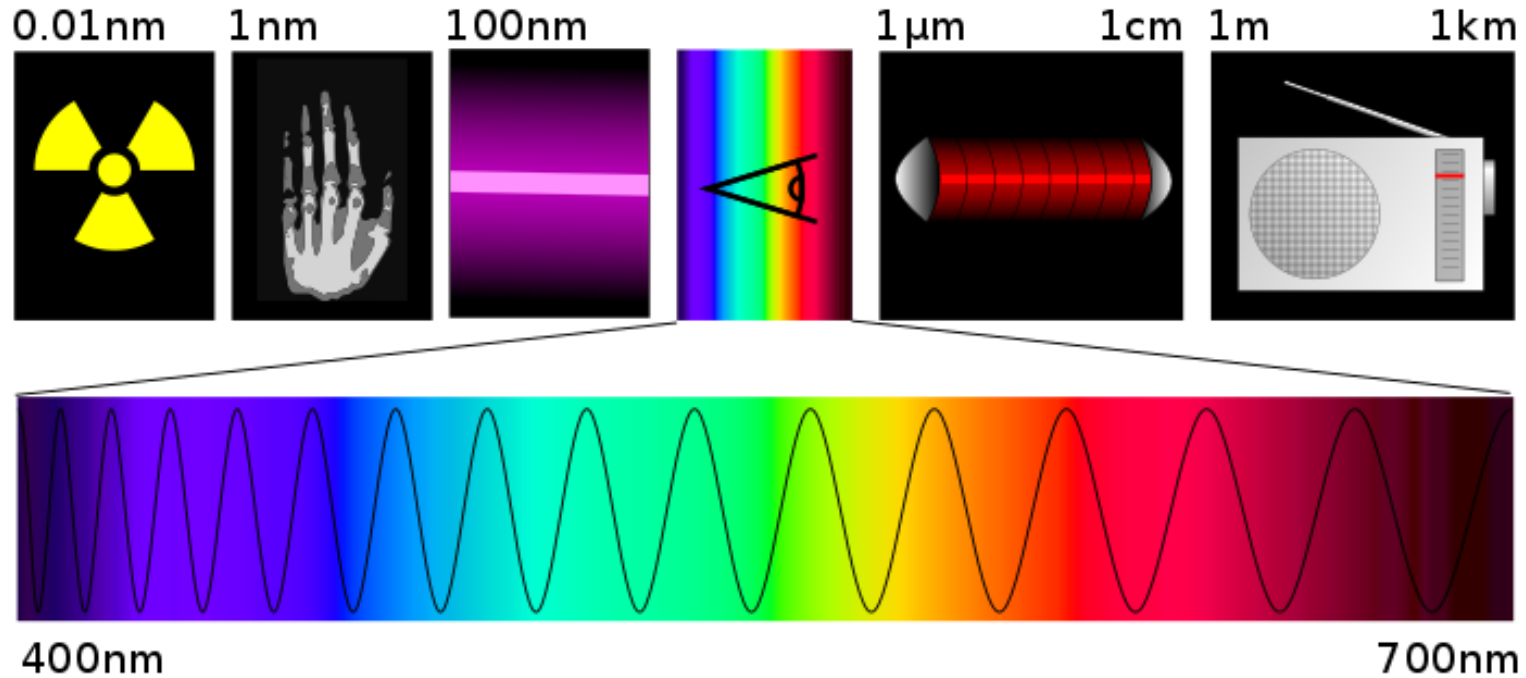
History of the Universe

Una grande energia ci riporta anche indietro ai primi istanti dell'universo

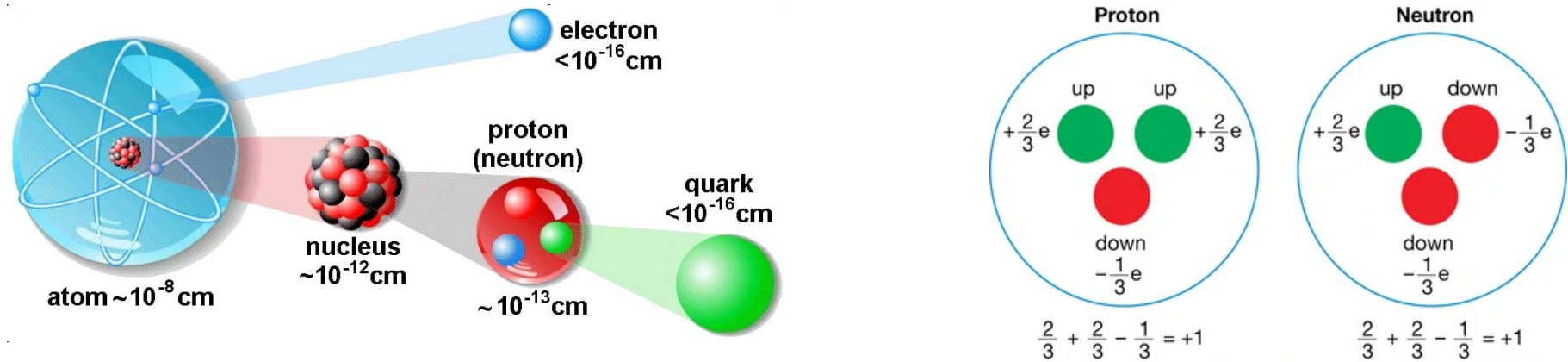
Le interazioni pp a LHC ci riportano indietro fino a qui



Spettro della luce visibile



Scala sub-atomica e sub-nucleare



Quark up, quark down in stati legati ed elettroni costituiscono la materia ordinaria

Quanto costa LHC?

1 Km di autostrada	30 M€
1 caccia F16 :	25 M€
1 bombardiere B-2 stealth	1000 M€
Acceleratore DAPHNE + esp. KLOE	150 M€
Bilancio annuale INFN	270 M€
→ ATLAS o CMS	330 M€
1 lancio di uno shuttle	400 M€
→ Costruzione LHC	2 G€
Space shuttle	4 G€
Ponte sullo stretto di Messina	5 G€
Bilancio annuale difesa americana	400 G€

LHC, pagato in **10 anni** dall'intera comunita' scientifica internazionale, costa come:

Una settimana di guerra in Iraq

Un centesimo di quanto stanziato dagli USA per contrastare il crack delle banche

Quanto viene speso al mondo in **una settimana**, per pubblicita'

Quattro bombardieri B-2

Meno di un centesimo della spesa militare mondiale

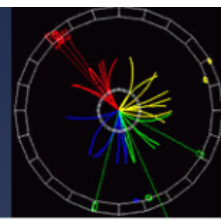
LHC e' costato ad **ogni cittadino italiano**:

1 euro e 20 centesimi l'anno, per 10 anni.

Per ogni euro speso dallo stato italiano per LHC, 1 euro e mezzo e' rientrato come commesse alle industrie italiane.

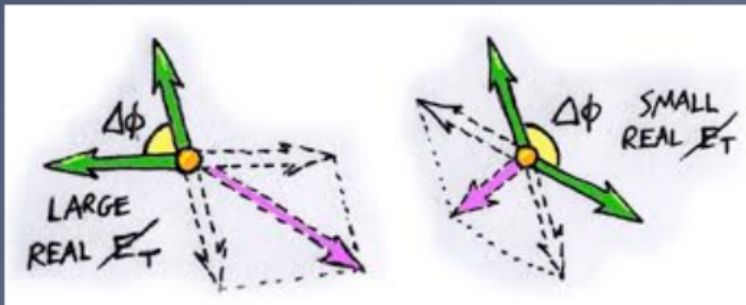
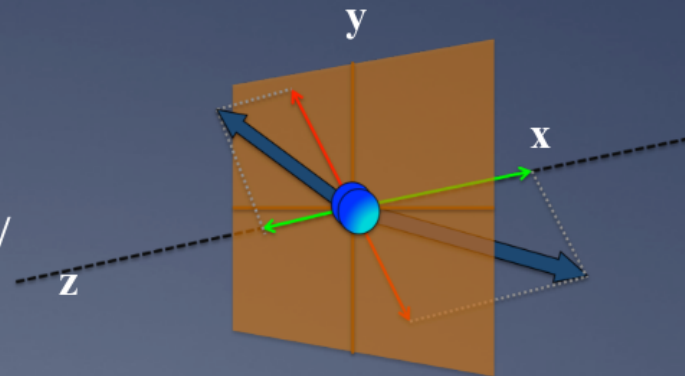
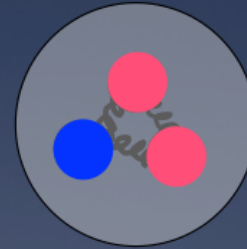
La ricerca scientifica e' anche un ottimo ritorno economico !

Perché ad LHC parliamo di quantità di moto ed energia "trasversa" ?

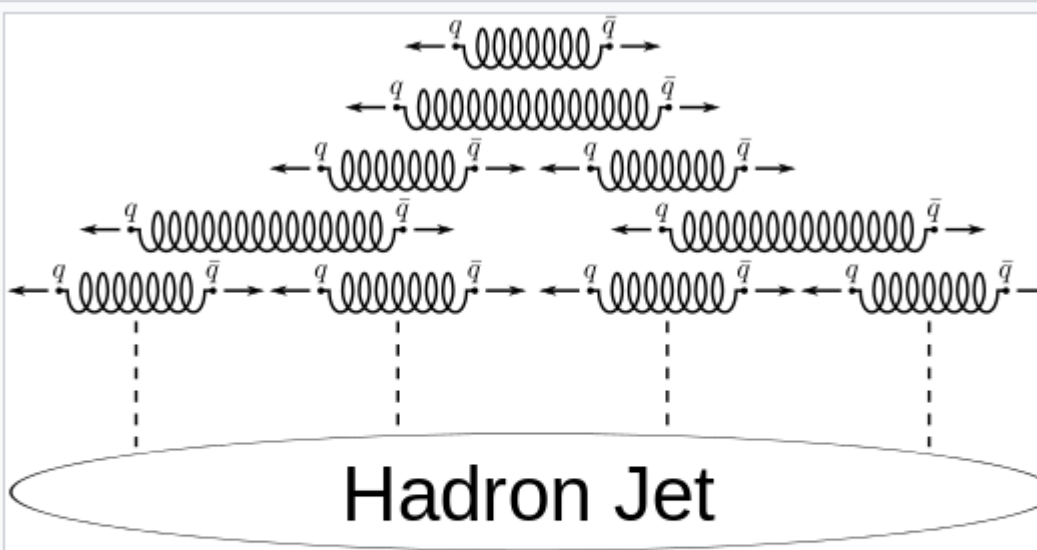


Hands on Particle Physics

- * la quantità di moto lungo l'asse di collisione del fascio non è nota
 - * non è possibile misurare le proprietà dei costituenti dei protoni che interagiscono
- * nel piano trasverso XY la quantità di moto di ogni protone e quella totale sono nulli.
- * ... e tale deve essere dopo la collisione (principio di conservazione della quantità di moto)
- * Ai colliders adronici il bilanciamento energia/quantità di moto si può usare solo nel piano trasverso



Jet di adroni



Hadron Jet

La forza di colore favorisce il confinamento perché diventa energeticamente più favorevole produrre una coppia quark-antiquark che continuare ad allungare il tubo del flusso di colore.

- Il confinamento si basa sul fatto che la forza dell'interazione aumenta con la distanza